

**EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DEL DESGASTE EN UNA MÁQUINA  
*PIN ON DISK* DE LOS ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS 304L Y P298A**

**DANIEL LÓPEZ GIRALDO**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PEREIRA  
2019**

**EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DEL DESGASTE EN UNA MÁQUINA  
*PIN ON DISK* DE LOS ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS 304L Y P298A**

**DANIEL LÓPEZ GIRALDO**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico**

**Director del proyecto:  
Ing. Jhon Diego Quintero Vásquez**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PEREIRA  
2019**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Pereira 15 de julio de 2019

*A Dios*

*A mis padres, Maryluz y Antonio*

*A mis hermanos, Jr. y Lord Juampiss*

*A mi Tía Madrina Maryory*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia, por el apoyo, esfuerzo y paciencia que han tolerado en todo mi proceso académico y educativo.

A la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) y todos sus docentes que me enseñaron y acompañaron durante mi carrera profesional, especialmente a los docentes de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

Al Doctor Juan Esteban Tibaquirá, decano de la Facultad de Ingeniería Mecánica – UTP, por su apoyo en procesos académicos y por sus valiosos consejos y enseñanzas para mi vida profesional.

Al Doctor José Wilmar Calderón, por haberme ofrecido el presente trabajo como mi proyecto de grado y por su acompañamiento, orientación y disposición a cualquier hora para resolver dudas al respecto. A su esposa, la Doctora Maryory Loaiza, por ser mi ejemplo a seguir y darme ánimo durante todo este proceso académico.

Agradecimiento muy especial a mi director de trabajo de grado, el Magíster Diego Quintero, por su gran paciencia, dedicación, acompañamiento y apoyo durante el desarrollo de toda la investigación. A su hermano, Samuel Quintero, Técnico del Laboratorio de Máquina Herramientas y Laboratorio de Metrología Dimensional de la UTP, por su apoyo y colaboración durante los procesos de mecanizado.

Al Doctor Dairo Hernán Mesa, director de la Escuela de Tecnología Mecánica de la UTP, al Doctor Edwan Anderson Ariza y al Doctor José Luis Tristancho, por su disposición y apoyo frente a la aclaración de dudas en los diferentes procesos de la investigación.

Al director del Laboratorio de Máquinas Herramientas, Doctor Alexander Díaz por poner a mi disposición las máquinas y equipos para la preparación de probetas y muestras para la investigación.

Al director del Laboratorio de Metalografía de la UTP, Doctor José Luis Tristancho, por poner a disposición los equipos e implementos de laboratorio para la caracterización metalográfica.

Al director del Laboratorio de Tribología de la UTP, Doctor Dairo Hernán Mesa por poner a disposición los equipos e implementos de laboratorio para los ensayos de desgaste.

Al director del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la UTP, Doctor Gabriel Calle, por su asesoría y disposición de equipos e implementos de laboratorio para los ensayos de dureza.

## RESUMEN

El acero inoxidable austenítico 304L es un acero estandarizado por la AISI (American Iron and Steel Institute), posicionado en el mercado con bastante reconocimiento por sus prestaciones. Sin embargo, el costo de adquisición de este material se ha incrementado en los últimos años debido a que su principal elemento austenitizante es el níquel. Este elemento se ha estado escaseando a nivel mundial y como consecuencia su costo de adquisición aumenta día a día. Esta problemática ha generado que los productores y comercializadores de inoxidables se fijen más en los aceros de la serie AISI 200, donde el elemento austenitizante principal es el manganeso y, por lo tanto, resultan ser más económicos.

El acero inoxidable austenítico P298A es una propuesta relativamente nueva que proviene de Brasil, no se ha estandarizado ni se ha introducido con firmeza en el mercado y su composición es similar a la del acero estandarizado AISI 201, donde el elemento austenitizante principal es el manganeso y por eso es más económico comparado con el AISI 304L. Sin embargo, no se encuentra literatura ni investigaciones alrededor de este material (por ser una propuesta nueva) y no se sabe con certeza como son sus prestaciones frente al AISI 304L.

En la presente investigación se evaluó y comparó la resistencia al desgaste por deslizamiento de los aceros inoxidables 304L y P298A, mediante ensayos de desgaste realizados en una máquina *Pin on Disk*, con una carga leve de 6 N y una carga severa de 20 N. Se utilizaron discos de prueba de cada material de 40 mm de diámetro y 3 mm de espesor y pines de acero AISI / SAE 4340 de 5 mm de diámetro y 21 mm de longitud. Además, se realizó una caracterización metalográfica de los materiales, se determinó el tamaño de grano de cada uno y se realizaron ensayos de dureza para ser correlacionados con los resultados de desgaste.

**Palabras clave:** aceros inoxidables austeníticos, elemento austenitizante, desgaste, máquina *Pin on Disk*, tribología, sistema tribológico, coeficiente de fricción, tamaño de grano.

## ABSTRACT

The austenitic stainless steel 304L was standardized by AISI (American Iron and Steel Institute) and this is a material positioned on market with rather recognition for its uses. Nonetheless, its purchase's cost has increased last years because its principal austenitizing element is nickel which has been running out in the world. That problem has done the producers and marketers of stainless put more focus in steels of the serie AISI 200, where the main austenitizing element is manganese, which done steels cheapest.

The austenitic stainless steel P298A is a new proposal from Brazil. This steel hasn't standardized and hasn't been introducing in the market yet; its composition is similar to AISI 201 steel, which main austenitizing element is manganese, doing it cheaper than AISI 304L. However, there aren't literature or investigations around P298A steel or comparisons against AISI 304L.

For that reason, this research evaluated and compared the wear resistance by glide from stainless steels 304L and P298A, through wear tests, done in a Pin-On-Disk machine with a light load of 6 N and a several load of 20 N. It has been used with a diameter of 40 mm and 3 mm of thickness and steel pins AISI / SAE 4340 with a diameter of 5 mm and 21 mm of long. Also, it has been done to metallographic characterization about materials, it has been determined the size of each one and it has been done hardness tests for correlate with wear results.

**Keywords:** austenitic stainless steels, austenitizing element, wear, Pin on Disk machine, tribology, tribological system, coefficient of friction, grain size.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	12
OBJETIVO GENERAL .....	13
Objetivos específicos.....	13
1. MARCO TEÓRICO.....	14
1.1. Definición y generalidades de los aceros inoxidables.....	14
1.2. Familias de aceros inoxidables.....	16
1.2.1. Aceros inoxidables martensíticos.....	16
1.2.2. Aceros inoxidables ferríticos.....	17
1.2.3. Aceros inoxidables austeníticos .....	18
1.2.4. Aceros inoxidables dúplex .....	22
1.2.5. Aceros inoxidables endurecibles por precipitación.....	22
1.3. Tribología.....	23
1.3.1. Fricción.....	24
1.3.2. Desgaste.....	24
2. METODOLOGÍA .....	28
2.1. Materiales.....	28
2.2. Preparación de probetas.....	29
2.3. Caracterización metalográfica.....	31
2.4. Tamaño de grano.....	32
2.5. Ensayo de desgaste.....	33
2.5.1. Pérdida de masa y tasa de desgaste.....	37
2.5.2. Coeficiente de fricción.....	38
2.6. Ensayo de dureza.....	38



3. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	40
3.1. Preparación de probetas.....	40
3.2. Caracterización metalográfica. ....	40
3.3. Tamaño de grano. ....	42
3.4. Ensayos de desgaste.....	43
3.4.1. Tasa de desgaste. ....	45
3.4.2. Coeficiente de fricción. ....	47
3.5. Resultados de dureza. ....	49
4. CONCLUSIONES .....	52
BIBLIOGRAFÍA.....	54

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Dimensiones de las placas de acero recibidas .....	28
<b>Tabla 2.</b> Composición química de los aceros estudiados .....	28
<b>Tabla 3.</b> Composición química de los pines utilizados en los ensayos de desgaste .....	28
<b>Tabla 4.</b> Resultados de tamaño de grano .....	43
<b>Tabla 5.</b> Resultados de tasa de desgaste .....	46
<b>Tabla 6.</b> Resultados de dureza en muestras no alteradas.....	49
<b>Tabla 7.</b> Resultados de dureza para el acero AISI 304L en las zonas afectadas por el desgaste ..	50
<b>Tabla 8.</b> Resultados de dureza para el acero P298A en las zonas afectadas por el desgaste .....	51

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Propiedades de aceros inoxidables con relación a elementos aleantes .....	14
<b>Figura 2.</b> Naturaleza de los parámetros del sistema tribológico .....	23
<b>Figura 3.</b> Definición de la fuerza de fricción .....	24
<b>Figura 4.</b> Esquema de dispositivos para evaluar el desgaste por deslizamiento .....	25
<b>Figura 5.</b> Máquinas utilizadas para la preparación de probetas .....	29
<b>Figura 6.</b> Prensa incluidora de especímenes metalográficos.....	30
<b>Figura 7.</b> Pulidora de paño velocidad variable.....	31
<b>Figura 8.</b> Microscopio óptico vertical Zeiss Primotech .....	32
<b>Figura 9.</b> Máquina Pin on Disk .....	33
<b>Figura 10.</b> Limpiador por ultrasonido y equipo de chorro de aire caliente.....	34
<b>Figura 11.</b> Báscula de precisión .....	35
<b>Figura 12.</b> Ensayo de desgaste .....	37
<b>Figura 13.</b> Escleroscopio HP-250 .....	39
<b>Figura 14.</b> Discos y pines obtenidos para los ensayos de desgaste .....	40
<b>Figura 15.</b> Muestras en baquelita para caracterización metalográfica y tamaño de grano .....	40
<b>Figura 16.</b> Microestructura y comparación del acero inoxidable AISI 304L .....	41
<b>Figura 17.</b> Microestructura y comparación del acero inoxidable P298A.....	41
<b>Figura 18.</b> Conteo de granos para el acero AISI 304L.....	42
<b>Figura 19.</b> Conteo de granos para el acero P298A.....	42
<b>Figura 20.</b> Superficies afectadas por los ensayos de desgaste .....	44
<b>Figura 21.</b> Coeficiente de fricción del acero AISI 304L con una carga de 6 N .....	47
<b>Figura 22.</b> Coeficiente de fricción del acero AISI 304L con una carga de 20 N .....	47
<b>Figura 23.</b> Coeficiente de fricción del acero P298A con una carga de 6 N .....	48
<b>Figura 24.</b> Coeficiente de fricción del acero AISI 304L con una carga de 20 N .....	48

## INTRODUCCIÓN

Actualmente el estudio de los materiales y de los fenómenos relacionados con ellos se ha convertido en una de las áreas del conocimiento de mayor interés dado su importancia como base para el desarrollo tecnológico de productos que van a satisfacer las necesidades de la industria y por ende de la sociedad en general. Por este motivo, han surgido nuevas ciencias dedicadas exclusivamente a estudiar este tipo de temas, como lo es la tribología. La tribología es una ciencia relativamente nueva que estudia los fenómenos relacionados con la fricción, el desgaste y la lubricación entre superficies que se encuentran en contacto y movimiento [1]. Estos fenómenos han sido los causantes de enormes pérdidas económicas en el sector industrial, debido a que el desgaste, al igual que la corrosión y la fatiga, son las principales causas por las cuales se deterioran las partes mecánicas de cualquier máquina [1]. De allí, la resistencia al desgaste se ha convertido en uno de los principales temas de estudio en el mundo de los materiales. Generalmente, en este tipo de investigaciones se desea conocer cómo la microestructura del material, su composición química y propiedades mecánicas, entre otras, influyen en el comportamiento tribológico.

En Colombia son pocas las facultades que han implementado laboratorios de tribología, entre ellas se encuentran, la Universidad Nacional, Universidad de Antioquia y la Universidad del Valle. Durante los últimos años en la Universidad Tecnológica de Pereira se ha logrado implementar un laboratorio de tribología con equipos básicos para preparación de probetas, caracterización de materiales y máquinas para ensayos de desgaste, lo cual nos permitirá incursionar un poco más en el campo de la tribología.

En el presente trabajo, se evaluó y comparó la resistencia al desgaste por deslizamiento en una máquina *Pin on Disk*, de los aceros inoxidable austeníticos AISI 304L y P298A, los cuales difieren principalmente en el contenido de manganeso (Mn) y níquel (Ni).

De lo anterior se pueden identificar dos preguntas a responder:

- 1) Entre los aceros inoxidable austeníticos 304L y P298A, ¿cuál es la microestructura más resistente al desgaste por deslizamiento evaluado en máquina *Pin on Disk*?
- 2) ¿Cómo la adición de Mn en aceros inoxidable austeníticos influencia la resistencia al desgaste por deslizamiento, evaluada en una máquina *Pin on Disk*?

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar y comparar la resistencia al desgaste por deslizamiento de los aceros inoxidables austeníticos 304L y P298A (evaluada en una máquina *Pin on Disk*), de acuerdo con los procedimientos de la norma ASTM G99-95a [2].

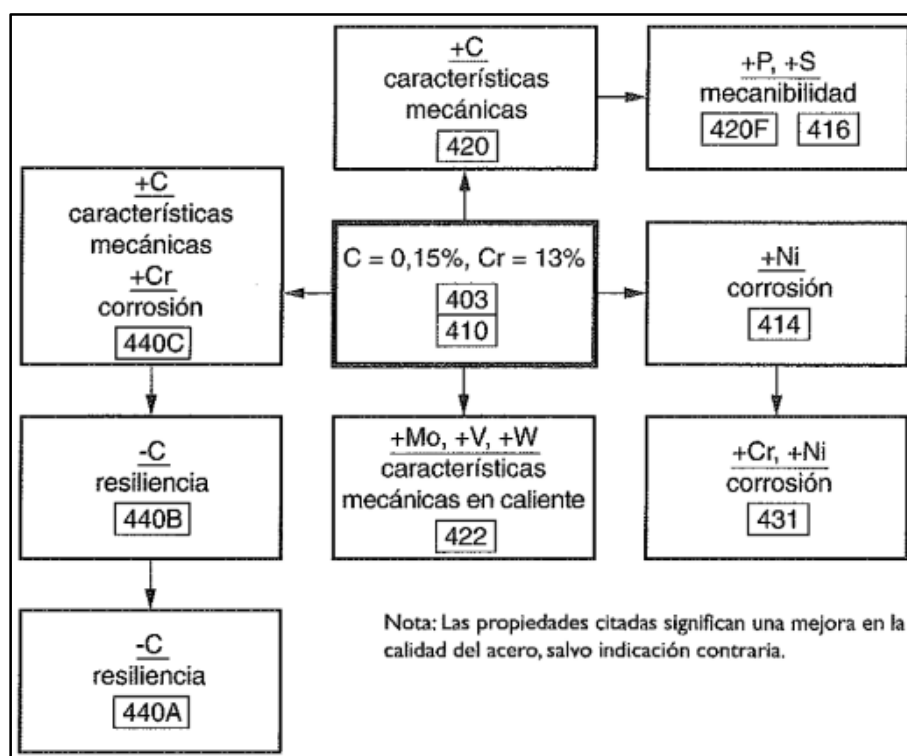
### **Objetivos específicos.**

- Realizar la caracterización microestructural de los aceros 304L y P298A a través de microscopio óptico para determinar su relación con la tasa de desgaste por deslizamiento.
- Determinar los mecanismos de desgaste, de los materiales escogidos, cuando son sometidos a carga leve y severa.
- Determinar si el ensayo de desgaste provoca un aumento de dureza en los aceros 304L y P298A por su condición como aceros austeníticos (aceros austeníticos se endurecen por deformación plástica).

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. Definición y generalidades de los aceros inoxidables.

Los aceros inoxidables son aleaciones de hierro (Fe), carbono (C – menos del 2%) y cromo (Cr – mínimo 10,5%) básicamente, el cromo es el aleante principal que da la característica de “inoxidable” al acero, pues al entrar en contacto con oxígeno y humedad, reacciona rápidamente y produce una capa protectora de óxido de cromo sobre el material, evitando que este se corroa; dicha capa tiene el mismo color del metal base y si es perforada o rayada, el cromo reacciona nuevamente y la repone al instante. Este elemento fue descubierto en 1978 por el francés Nicolas-Louis Vauquelin, pero solo hasta 1820 se llevaron a cabo las primeras experiencias de aleaciones hierro – cromo [3]. Luego, gracias a los avances tecnológicos del siglo XX y a la invención de los hornos eléctricos, se ha podido producir a gran escala y a bajos costos aleaciones de alta pureza y complejidad como son los aceros inoxidables [3]. Desde entonces, han surgido diferentes innovaciones e investigaciones alrededor de los aceros inoxidables, especialmente en los elementos aleantes utilizados y en el mejoramiento de sus propiedades.



**Figura 1.** Propiedades de aceros inoxidables con relación a elementos aleantes. Adaptada de [3].

La clasificación más utilizada para los aceros inoxidable es sin duda la estipulada por la AISI (American Iron and Steel Institute), quien los clasifica de la siguiente manera:

- Aceros austeníticos al cromo-manganeso-níquel, designados con un número de 3 cifras que comienza con 2 (serie 200), las dos últimas cifras son para diferenciar un tipo del otro.
- Aceros austeníticos al cromo-níquel, designados con un número de 3 cifras que comienza con 3 (serie 300), las dos últimas cifras se utilizan para lo mismo del párrafo anterior.
- Aceros ferríticos y martensíticos al cromo solo, designados con un número de 3 cifras que comienza con 4 (serie 400), las dos últimas cifras se utilizan para lo ya expuesto.

El acero AISI 304L es bastante utilizado en la industria y el P298A es una propuesta relativamente nueva donde parte del elemento austenitizante (Ni) es reemplazado por Mn, haciéndolo más económico. Cabe destacar que el acero P298A ya ha sido comercializado, pero no está normalizado (precisamente por ser una propuesta nueva), es bastante similar al acero normalizado AISI 201 [4], estos materiales se tienden a confundir, pero no son iguales, el último posee alto contenido de Nitrógeno (N) dándole otras propiedades.

Según Charles [5], uno de los inconvenientes que se ha presentado en la producción de aceros inoxidable austeníticos en los últimos años, ha sido la fluctuación a nivel mundial en los precios del Ni (agente austenitizador). El acero austenítico AISI 304L ha sido líder mundial en el mercado desde hace varias décadas, pero dicha inestabilidad en los precios del níquel ha llevado a la búsqueda de otros elementos austenitizadores para su reemplazo, lo cual, concentra la atención sobre los aceros de la serie AISI 200, donde el manganeso puede sustituir en parte al níquel en esta tarea.

En cuanto a resistencia mecánica, el comportamiento de ambos aceros es similar, pero en lo que se refiere a resistencia al desgaste, las investigaciones han sido pocas; el acero AISI 304L ya fue estudiado por María Cristina Moré Farías [6], sin embargo, del P298A no se encuentra bibliografía relacionada y allí es donde este trabajo pretende contribuir a la literatura especializada.

## 1.2. Familias de aceros inoxidables.

Dentro del estudio de los aceros inoxidables se han estipulado las siguientes familias:

### 1.2.1. Aceros inoxidables martensíticos: Fe + Cr (12 – 19%) + C (0,08 – 1,2%)

Son la primera rama de los aceros inoxidables simplemente al cromo. Fueron los primeros que se desarrollaron industrialmente y representan una porción de la serie AISI 400. El contenido de cromo y carbono esta balanceado para asegurar una estructura martensítica. Sus características principales son [7]:

- Moderada resistencia a la corrosión.
- Endurecibles por tratamiento térmico y por ende pueden desarrollar elevada resistencia mecánica y dureza.
- Magnéticos.
- Debido al alto contenido de carbono y a la naturaleza de su dureza, son de pobre soldabilidad.
- Después de ser tratados para endurecimiento, son utilizados en procesos de maquinado y formado en frío.

Tipos de aceros inoxidables martensíticos [7]:

- **AISI 410:** con excelente ductilidad y fácil de trabajar, lo que lo hace buena opción para procesos de formado severos y trabajo en frío. Es fácilmente soldable, aunque se debe recocer después del proceso. No se recomienda para condiciones severas de corrosión, pero presenta buena resistencia a temperaturas por debajo de los 650 °C. **APLICACIONES:** cuchillería, tijeras, partes para válvulas, maquinaria para minería, partes para turbinas de vapor, flechas para bombas, etc.
- **AISI 416:** el selenio le ofrece una excelente maquinabilidad, lo que lo hace adecuado para fabricación de piezas en máquinas automáticas. También posee excelente ductilidad, soldabilidad y trabajo en frío, buena resistencia a la corrosión para temperaturas por debajo de los 650 °C. **APLICACIONES:** tonillos, espárragos, tuercas, conectores, cerraduras, cabezas de palos de golf, partes de bombas, flechas, partes de válvulas, etc.



- **AISI 420:** modificación del 410, con alto contenido de carbono que le permite alcanzar mayor dureza y resistencia al desgaste, pero reduce su resistencia a la corrosión. **APLICACIONES:** instrumentos dentales y quirúrgicos, hojas de cuchillos, moldes, herramientas, etc.
- **AISI 431:** al someterlo a tratamientos térmicos se elevan notablemente sus propiedades mecánicas, dándole una excelente ductilidad y resistencia al impacto, combinadas con una buena resistencia a la corrosión. **APLICACIONES:** flechas para barco y para uso industrial, tensores y partes para la industria aeronáutica, etc.
- **AISI 440:** se utiliza para aplicaciones que requieren una elevada dureza, resistencia a la abrasión y buena resistencia a la corrosión, tiene baja maquinabilidad. **APLICACIONES:** cuchillería, partes resistentes al secado, equipo quirúrgico, inyectores, etc.

#### 1.2.2. Aceros inoxidables ferríticos: Fe + Cr (10,5 – 30%) + C (0,015 – 0,08%)

Estos aceros pertenecen a la serie AISI 400 y mantienen su estructura ferrítica estable desde la temperatura ambiente hasta el punto de fusión. Pueden contener molibdeno, silicio, aluminio, titanio y niobio. Sus características son [7]:

- Resistencia a la corrosión entre moderada y buena, la cual puede mejorar con el contenido de cromo y en algunas aleaciones con molibdeno.
- Endurecidos moderadamente por trabajo al frío, no pueden ser endurecidos por tratamientos térmicos.
- Las aleaciones ferríticas son magnéticas.
- Su soldabilidad es débil, por lo cual se limita a uniones por soldadura solo a calibres delgados.
- Usualmente se les aplica un tratamiento térmico de recocido, con lo cual mejora su suavidad, ductilidad y resistencia a la corrosión.
- Debido a su pobre dureza, se limita generalmente a usos de trabajo en frío.

Tipos de aceros inoxidable ferríticos [7]:

- **AISI 405:** conocido como un grado soldable del tipo 410. **APLICACIONES:** partes resistentes al calor, equipos para refinación de calor, racks para templado de acero.
- **AISI 409:** acero estructural de uso general, para aplicaciones que no requieran de alta calidad de apariencia. **APLICACIONES:** silenciadores y convertidores catalíticos para automóviles, cajas de tráiler, tanques de fertilizantes, contenedores.
- **AISI 430:** soldable y con excelente ductilidad, se recomienda para aplicaciones donde se requiera una aleación fácil de trabajar y que se moldee a las formas deseadas de doblado, troquelado o estirado. El acabado brillante de su superficie lo hace resistente al ataque de una atmósfera ordinaria y posee una buena resistencia a la corrosión hasta temperaturas de 760 °C. **APLICACIONES:** molduras para automóviles, acabados arquitectónicos, máquinas procesadoras del tabaco, aparatos científicos y domésticos, etc.
- **AISI 446:** contiene el máximo contenido de cromo de toda la familia ferrítica, lo que lo hace el más resistente a la corrosión de su clase, se recomienda para uso en atmosferas de comportamiento azufroso de altas temperaturas, hasta 1000 °C. No debe ser utilizado en aplicaciones que requieran alta resistencia mecánica. **APLICACIONES:** fabricación de bases para tubos de rayos X, partes de quemadores, tubos para pirómetros, válvulas y conectores, etc.

#### 1.2.3. Aceros inoxidable austeníticos: Fe + Cr (16 – 28%) + Ni (6 – 32%) + C (0,02 – 0,1%)

Estos aceros constituyen la familia con la mayor cantidad de aleaciones disponibles, integra las series AISI 200 y 300. Su popularidad se debe a su excelente formabilidad y superior resistencia a la corrosión. Sus características son [7]:

- Excelente resistencia a la corrosión.
- Endurecidos por trabajo en frío y no por tratamiento térmico.
- Excelente soldabilidad.
- Excelente factor de higiene y limpieza.

- Formado sencillo y de fácil transformación.
- Son funcionales en temperaturas extremas, bajas temperaturas previniendo la fragilización, y altas temperaturas hasta los 925 °C.
- Son esencialmente no magnéticos. Pueden ser magnéticos luego de que son tratados en frío. El grado de magnetismo depende del tipo de aleación que se trate.

Los aceros austeníticos se obtienen añadiendo elementos generadores de austenita tales como níquel, manganeso y nitrógeno. El cromo proporciona una resistencia a la oxidación en temperaturas aproximadas a los 650 °C en una variedad de ambientes.

En la serie AISI 300 (la más extensa), mantiene un alto contenido de níquel y hasta un 2% de manganeso. También pueden contener molibdeno, cobre, silicio, aluminio, titanio y niobio, elementos que se adicionan para adquirir ciertas características. En ciertos tipos se usa azufre o selenio para mejorar su maquinabilidad.

En la serie AISI 200 contienen menor cantidad de níquel. El contenido de manganeso es del 5 al 20%. La adición de nitrógeno incrementa la resistencia mecánica.

Tipos de aceros inoxidable austeníticos [7]:

- **AISI 201/J4:** es conocido como el sustituto del AISI 304, pero con niveles más bajos de níquel. Su bajo porcentaje de níquel esta compensado por la contribución mejorada de los 4 elementos que la componen: carbono, manganeso, cobre y nitrógeno. **APLICACIONES:** aparatos domésticos, ornamentales, escaleras, muebles, estructura automotriz o en otras aplicaciones de uso estructural (por su dureza) con exposición limitada a la corrosión.
- **AISI 202/JSL AUS:** también es conocido como sustituto al AISI 304, con mayor contenido de níquel que el AISI 201. Por su idéntica respuesta mecánica al clásico AISI 304, lo hace el mejor candidato para suplirlo en diversas aplicaciones. **APLICACIONES:** aparatos domésticos, ornamentales, escaleras, ganchos, productos para embutidos extra profundos, o en otras aplicaciones con exposición limitada a la corrosión.
- **AISI 301:** menor resistencia a la corrosión que otros aceros de la serie AISI 300. Puede ser fácilmente formado y presenta buena soldabilidad. **APLICACIONES:** partes de aviones,

adornos arquitectónicos, cajas de ferrocarril y tráiler, cubierta de rines, equipos para procesamiento de alimentos.

- **AISI 303:** presenta una excelente maquinabilidad, lo que lo hace ideal para fabricación de piezas en máquinas automáticas. Tiene buena resistencia a la corrosión cuando se expone a atmosferas ordinarias de hasta 920 °C, también a soluciones esterilizadas, la mayoría de los químicos orgánicos, tintes y pintura, ácido nítrico y comida. En condiciones severas de corrosión no se recomienda para temperaturas mayores a los 760 °C. **APLICACIONES:** tornillos, tuercas, flechas y piezas maquinadas en general.
- **AISI 304:** excelente ductilidad y maleabilidad, posee buena resistencia a la corrosión hasta temperaturas de 920 °C en servicio continuo y hasta 870 °C en servicio intermitente, su bajo contenido de carbono lo hace apropiado para procesos de soldadura; ofrece características mejoradas para el maquinado. **APLICACIONES:** evaporadores, barriles de cerveza, tanque de oxígeno líquido, muebles de cocina y laboratorio, partes para válvulas, accesorios para aviones, remaches, equipos para hospitales, etc.
- **AISI 304L:** es una variación de bajo carbón del AISI 304, lo que evita daños por la inclusión de partículas o residuos de metal con carbón debido a la soldadura. Tiene la misma resistencia a la corrosión y propiedades mecánicas un poco más bajas que el AISI 304. Ofrece características mejoradas para el maquinado, evita la SCC (Stress Corrosion Cracking). **APLICACIONES:** recubrimiento para tolvas de carbón, tanques de pulverización de fertilizantes líquidos, tanques de almacenamiento de pasta de tomate, especialmente cuando las partes no pueden recibir tratamiento térmico después de soldar.
- **AISI 309:** posee alta resistencia mecánica, tenacidad y excelente resistencia a la oxidación hasta temperaturas de 1000 °C. **APLICACIONES:** calentadores de aire, equipo químico de proceso, partes de quemadores de turbinas de gas, intercambiadores de calor, etc.
- **AISI 310:** por su mayor contenido de cromo y níquel poseen gran resistencia a la corrosión hasta temperaturas de 1100 °C, recomendable para servicio intermitente, ofrece una mejor

resistencia a la corrosión en componentes soldados. **APLICACIONES:** intercambiadores de calor, partes para turbinas de gas, incineradores, hornos industriales, etc.

- **AISI 316:** poseen buena ductilidad y soldabilidad. La adición de molibdeno le confiere una mejor resistencia a la corrosión y a la penetración que las demás aleaciones, en particular bajo condiciones de corrosión ácida, en temperaturas de hasta 870 °C, en una atmosfera ordinaria. **APLICACIONES:** adornos arquitectónicos, equipo para el procesamiento de alimentos, farmacéutico, fotográfico, textil, etc.
- **AISI 316L:** es una variación de bajo carbón del AISI 316, lo que evita daños por la inclusión de partículas o residuos de metal con carbón debido a la soldadura. Tiene la misma resistencia a la corrosión y ofrece propiedades mejoradas para el maquinado. Evita la SCC (Stress Corrosion Cracking). **APLICACIONES:** equipo de las industrias químicas, farmacéutica, textil, petrolera, papel, celulosa, caucho, nylon y tintas, barriles de fermentación, piezas de válvulas, tanques, agitadores y evaporadores, condensadores, piezas expuestas al ambiente marítimos, etc.
- **AISI 316Ti:** mejor resistencia a la temperatura y mecánica que el AISI 316L. **APLICACIONES:** equipos para industrias químicas y petroquímicas.
- **AISI 321:** estabilizado con adición de titanio lo que le confiere una excelente resistencia a la corrosión severa bajo procesos de soldadura y trabajo a temperaturas de hasta 920 °C. Se utiliza en equipos que no puedan ser recocidos, o que trabajen en un rango de temperaturas de 430 °C a 820 °C y posteriormente ser sometidos a un enfriamiento lento. **APLICACIONES:** sistemas de escape para aviones, tanques sometidos a soldadura, partes para hornos, turbocargadores, partes de motores de jet, divisiones de fuego, etc.

#### 1.2.4. Aceros inoxidables dúplex: $\text{Fe} + \text{C} + \text{Cr} (18 - 26\%) + \text{Ni} (4,5 - 6,5\%) + \text{Mo} (1,5 - 3\%)$

Estos aceros son los de más reciente desarrollo; son aleaciones cromo-níquel-molibdeno que forman una mezcla en cantidades aproximadamente iguales a austenita y ferrita. Pueden adicionarles nitrógeno, molibdeno, cobre, silicio y tungsteno para controlar el balance en la configuración metalográfica y dar ciertas características a la resistencia a la corrosión. Sus características principales son [7]:

- Son magnéticos.
- No pueden ser endurecidos por tratamientos térmicos.
- Buena soldabilidad.
- La estructura dúplex mejora la resistencia a la corrosión de fractura bajo tensión en ambientes con iones de cloruro.

#### 1.2.5. Aceros inoxidables endurecibles por precipitación: $\text{Fe} + \text{C} + \text{Cr} (12 - 18\%) + \text{Ni} (4 - 9\%)$

Los elementos que producen el endurecimiento por precipitación son el molibdeno, titanio, nitrógeno, cobre, aluminio, tántalo, niobio, boro y vanadio. Esta familia ofrece una alternativa a los aceros inoxidables austeníticos cuando se requiere una resistencia mecánica elevada y de maquinabilidad obtenida a partir del endurecimiento por tratamiento térmico de envejecimiento. Los aceros endurecibles por precipitación están patentados y por lo general se designan con las siglas de la empresa productora. Sus características son [7]:

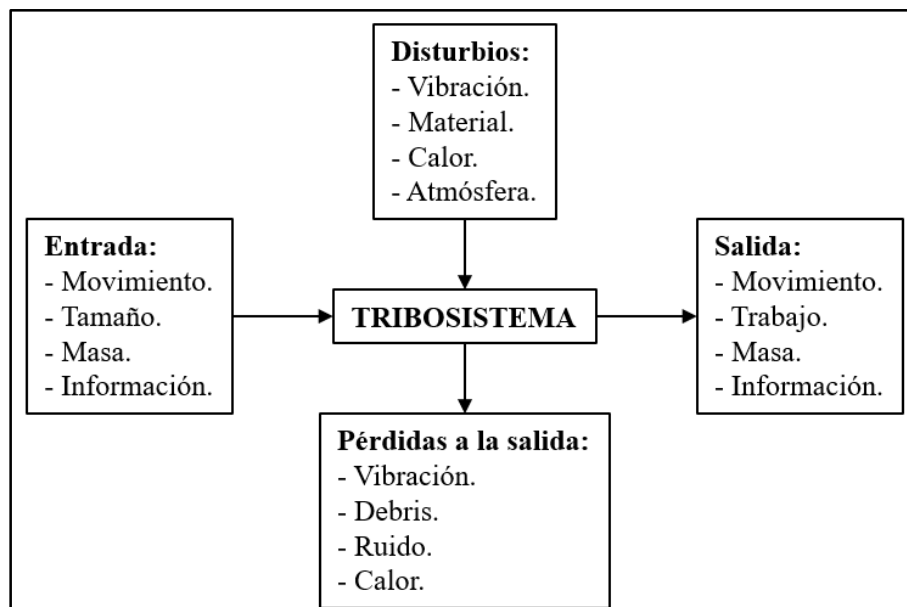
- Moderada a buena resistencia a la corrosión.
- Muy alta resistencia. Pueden lograrse hasta 1800 MPa (excediendo la resistencia de los aceros inoxidables martensíticos) con resistencia similar a la del AISI 304.
- Buena soldabilidad.
- Magnéticos.

### 1.3. Tribología.

Se sabe que el desgaste, al igual que la fatiga y la corrosión, son la principal causa de fallas en componentes mecánicos de maquinaria y equipos, generando pérdidas económicas para sus dueños [1]. De aquí nace la importancia y el interés de estudiar este tipo de fenómenos con el fin de prevenirlos o reducirlos minimizando costos de mantenimiento.

La tribología se define como la ciencia que estudia el comportamiento de cuerpos en contacto y movimiento relativo entre sí, incluyendo los conceptos de fricción, desgaste y lubricación [8]. La fricción como la fuerza que se opone al movimiento, el desgaste como consecuencia y la lubricación como una solución para prevenirlo.

Al contacto y movimiento relativo entre cuerpos se les conoce como “sistema tribológico” o “tribosistema”, y en él se involucran múltiples variables como las características y naturaleza de los materiales en contacto, las geometrías de contacto, las cargas aplicadas entre sí, las condiciones del ambiente que los rodea (temperatura, humedad, radiación, etc.), si hay o no un tercer material o elemento entre ellos (por ejemplo, lubricantes), entre muchas otras [1], haciendo que los “tribosistemas” sean sumamente complejos y difíciles de estudiar, comprender y sobre todo predecir.



**Figura 2.** Naturaleza de los parámetros del sistema tribológico. Adaptada de [9].

Los resultados más básicos e importantes de todo “tribosistema” son el valor del coeficiente de fricción entre los cuerpos en contacto y el tipo de desgaste que presentan [1], con ellos se puede analizar los posibles cambios que se deben aplicar para que los resultados del “tribosistema” mejoren.

### 1.3.1. Fricción.

Se define como la resistencia al movimiento relativo entre dos o más sustancias (masa de fluidos, gases, sólidos o sus combinaciones) [10].

Ciertos sistemas requieren de valores de coeficientes fricción bajos como bisagras, rodamientos, pistón-camisa, entre otros, sin embargo, no siempre es deseable tener baja fricción, por ejemplo, en sistemas como freno-embrague, llanta-asfalto, suela-piso, etc. [10].

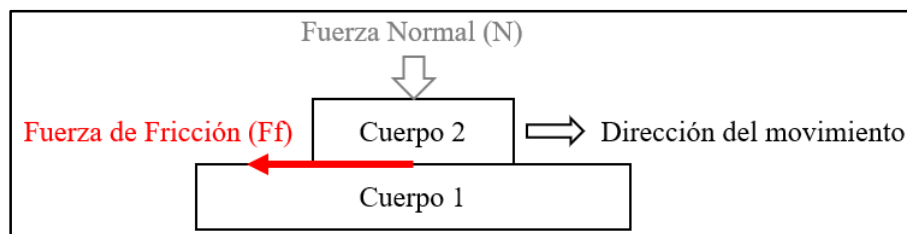
Matemáticamente el coeficiente de fricción ( $\mu$ ) puede calcularse como:

$$\mu = \frac{F_f}{N}$$

Donde:

$F_f$ : fuerza de fricción que actúa en la superficie de contacto.

$N$ : fuerza normal o carga aplicada.



**Figura 3.** Definición de la fuerza de fricción. Adaptada de [11].

### 1.3.2. Desgaste.

Se define como el daño, deterioro o deformación que sufre la superficie de un material luego de haberlo sometido a ciertas condiciones de trabajo, en algunos casos se puede afectar la sub-superficie [12]. No es una propiedad del material, sino la respuesta de un sistema tribológico, ya que es afectado por una gran cantidad de variables y características.



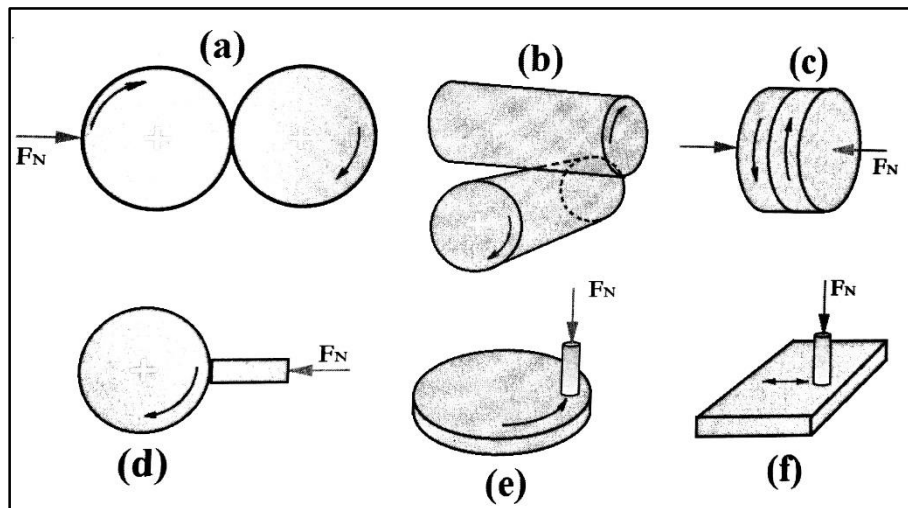
El desgaste es la principal causa de pérdida de tolerancias en componentes mecánicos, lo que disminuye la vida útil y confiabilidad de máquinas y equipos; es así como ha llegado a convertirse en un tema de gran interés para mejorar el desarrollo y confiabilidad de la tecnología futura [1].

Desde que el desgaste comenzó a ser un tópico importante que necesitaba ser estudiado y entendido, han surgido ideas sencillas de cómo prevenirlo o combatirlo, algunas de esas ideas son:

- Mantener baja la presión de contacto.
- Mantener baja la velocidad de deslizamiento.
- Mantener lisas las superficies de piezas rodantes o deslizantes.
- Usar materiales más duros.
- Asegurar bajos coeficientes de fricción.
- Usar lubricantes.

Estos son algunos parámetros que se pueden controlar, sin embargo, se necesitan mentes más abiertas al problema y usar métodos de diseño basado en programas computacionales y trabajo interdisciplinario [1].

Existen varias técnicas para evaluar el desgaste, pero las más utilizadas son las técnicas por deslizamiento que se presentan en la figura 4.



**Figura 4.** Esquema de dispositivos para evaluar el desgaste por deslizamiento. Tomado de [1].

Es importante resaltar la técnica pin sobre disco (e) que se utilizará en la presente investigación.

Las piezas mecánicas pueden degradarse gracias al desgaste de diferentes maneras, dependiendo de la forma en que interactúan las superficies en contacto, lo que lleva a una clasificación llamada “tipos de desgaste”, algunos de ellos son: adhesivo, abrasivo, erosivo, corrosivo, entre otros. La forma como se deterioran las superficies se les ha denominado “mecanismos de desgaste”, entre los cuales esta: corte, surcado, deformación plástica, fatiga, entre otros [12].

Los tipos y mecanismos de desgaste más comunes son [13]:

1) Desgaste adhesivo.

Debido a los altos esfuerzos localizados en los puntos de contacto, se generan elevadas fuerzas de deslizamiento (fuerza de fricción) que desgarran material de la superficie y lo adhieren a otra. Se reconoce como una deformación plástica en la superficie del material y con el tiempo puede provocar un daño mayor.

2) Desgaste abrasivo.

Este tipo de desgaste puede presentarse en condiciones secas o bajo la presencia de un fluido. Es la remoción de material de la superficie, las partículas desprendidas pueden deslizarse entre las superficies o incrustarse en algunas de ellas generando un tipo de desgaste erosivo. Se reconoce como surcos, rayones, cavidades y en general falta de material.

3) Desgaste por fatiga.

Es el mecanismo predominante de la mayoría de los tipos de desgaste y hace alusión al desprendimiento de material de la superficie por fatiga, ya sea que el movimiento relativo entre las superficies sea unidireccional o de vaivén. Sin embargo, el término de desgaste por fatiga se ha utilizado comúnmente para identificar fallas en contactos lubricados como rodamientos, engranes, levas, etc.

4) Desgaste erosivo.

Este tipo de desgaste genera pérdidas en la superficie del material por partículas abrasivas que se encuentran suspendidas en un líquido en está en contacto y movimiento sobre la superficie. Cuando el movimiento de las partículas es casi paralelo a la superficie erosionada, se denomina erosión abrasiva, cuando el movimiento de las partículas es casi perpendicular a la superficie erosionada, se denomina erosión bajo impacto.

#### 5) Desgaste corrosivo.

En esta forma de desgaste, las reacciones químicas o electroquímicas con el medio ambiente contribuyen a la velocidad de desgaste. Algunas veces, las reacciones ocurren primero y posteriormente se remueven los productos de la corrosión por un movimiento mecánico (abrasión), en otros casos, el movimiento puede ocurrir antes de la reacción, lo que genera pequeñas partículas de desperdicio sobre la superficie.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Materiales.

Los aceros inoxidable austeníticos estudiados (AISI 304L y P298A) fueron adquiridos por el laboratorio de tribología de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) a través de cooperación científica con el laboratorio de procesos electroquímicos de la Universidad de São Paulo (Brasil). Estos se recibieron en forma de placas laminadas en caliente de las siguientes dimensiones:

**Tabla 1.** Dimensiones de las placas de acero recibidas.

ACERO	DIMENSIONES		
	LARGO [mm]	ANCHO [mm]	ESPESOR [mm]
AISI 304L	293	85	3
P298A	203	171	3

La composición química de cada acero es presentada en la tabla 2 [4], donde se puede apreciar que la principal diferencia entre ellos es el contenido de manganeso (Mn) y níquel (Ni).

**Tabla 2.** Composición química de los aceros estudiados [4].

ACERO	C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	N PPM	Ti %	Cu %	Co %
P298A	0,029	5,82	0,32	0,035	0,002	17,17	4,64	0,023	615	0,0039	1,564	0,047
AISI 304L	0,017	1,54	0,44	0,035	0,001	18,53	8,03	0,047	483	-	-	-

De dichas placas se obtuvieron los cuerpos de prueba para los ensayos de desgaste y las muestras para la caracterización metalográfica.

Los pines utilizados en los ensayos de desgaste fueron maquinados en acero AISI / SAE 4340 y su composición química se presenta en la tabla 3 [14].

**Tabla 3.** Composición química de los pines utilizados en los ensayos de desgaste [14].

ACERO	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
AISI/SAE 4340	0,42	0,67	0,21	0,028	0,21	0,81	1,85	0,21

Se utilizó el acero AISI / SAE 4340 (en estado bonificado) en la fabricación de los pines, debido a que su dureza (89 HRB) es similar a la de los aceros estudiados, y, además, es un acero comercial utilizado en una gran variedad de componentes mecánicos en la industria, lo que nos podría dar un acercamiento a una simulación de un posible sistema real; tiene baja susceptibilidad al fragilizado, alta resistencia al desgaste y tenacidad. Esta fue una recomendación de varios investigadores expertos en ensayos de *Pin on Disk* [14].

## 2.2. Preparación de probetas.

La norma ASTM G99-95a [2] (para realizar ensayos de desgaste), indica que el diámetro de los discos de prueba debe encontrarse entre los 30 y 100 mm y que su espesor debe estar en el rango de los 2 a 10 mm, además, que el pin a utilizar debe tener un diámetro entre los 2 y 10 mm.

Adoptando estos lineamientos, se maquinaron 12 cuerpos de prueba de 40 mm diámetro y 3 mm de espesor, 6 por cada material estudiado. Con la ayuda de una cizalla se cortó la lámina en polígonos que tuvieran contenido la circunferencia del disco a obtener, posteriormente, se utilizó un taladro vertical para hacer agujeros de 6 mm de diámetro en el centro de las probetas; estos agujeros se utilizarían para sujetar el disco en la máquina *Pin on Disk*, finalmente, se utilizó un torno paralelo para maquinar las circunferencias trazadas al interior de los polígonos y terminar por completo los discos de prueba para el ensayo *Pin on Disk*. Cabe mencionar que para el maquinado en el torno se utilizó un torneador para la sujeción del disco.

Las máquinas utilizadas pertenecen al Laboratorio de Máquinas Herramientas de la UTP.



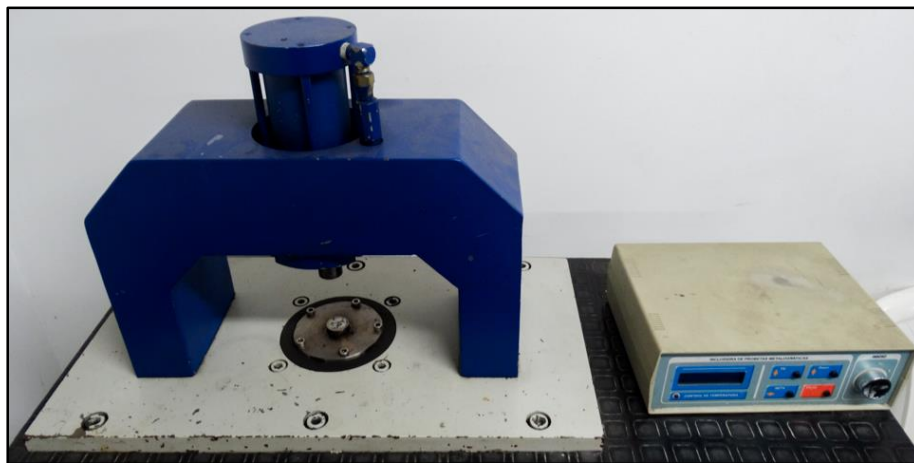
**Figura 5.** Máquinas utilizadas para la preparación de probetas.

La norma también indica que los discos de prueba deben tener una rugosidad superficial de  $0,8\text{ }\mu\text{m}$  de promedio aritmético o menos, por lo que se midió la rugosidad superficial de los aceros y se obtuvo que para el AISI 304L la rugosidad superficial se encontraba alrededor de  $0,12\text{ }\mu\text{m}$  (valor aceptable), sin embargo, el P298A presentó valores de rugosidad superficial muy por encima del recomendado por la norma, alrededor de  $2,68\text{ }\mu\text{m}$ . Por esta razón fue necesario pulir con papel de lija # 400 y # 1000 la superficie de todos los discos de prueba de este acero hasta obtener un valor de rugosidad aceptable. Finalmente se obtuvo valores de rugosidad superficial alrededor de  $0,6\text{ }\mu\text{m}$  en los discos de prueba del inoxidable P298A.

Se maquinaron 12 pines de 5 mm de diámetro y una longitud promedio de 21 mm y se asignó un pin a cada disco.

Se utilizó nuevamente la cizalla para obtener una muestra de cada acero, las cuales fueron empastilladas en baquelita termo estable o resina al frío para mejorar su manipulación. Estas muestras fueron utilizadas para la caracterización metalográfica y determinación del tamaño de grano de los aceros estudiados.

El equipo para empastillar pertenece al Laboratorio de Metalografía de la UTP.



**Figura 6.** Prensa incluidora de especímenes metalográficos.

### 2.3. Caracterización metalográfica.

Se realizó una caracterización microestructural de los aceros estudiados mediante microscopía óptica. Las muestras de acero cortadas y embutidas en baquelita (ver figura 15), fueron pulidas inicialmente con papel de lija # 100, # 220, # 400, # 600, # 1000 y # 1200, posteriormente, se utilizaron paños metalográficos con pasta de diamante de 6  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  y 1  $\mu\text{m}$  hasta lograr un acabo tipo espejo en la superficie del acero; esta superficie fue atacada por inmersión en un reactivo químico denominada Vilella el cual se compone de 5 mL de HCL (ácido clorhídrico), 2 g de ácido pícrico y 100 mL de etanol; este reactivo ayuda a revelar la microestructura del acero y los contornos de los granos [14]. Por último, las muestras fueron examinadas a través de un microscopio óptico.

Los equipos utilizados pertenecen al Laboratorio de Metalografía de la UTP.



**Figura 7.** Pulidora de paño velocidad variable.



**Figura 8.** Microscopio óptico vertical Zeiss Primotech.

#### **2.4. Tamaño de grano.**

Se cuantificó el tamaño de grano de los aceros estudiados con el fin de relacionar el refinamiento del grano con la resistencia al desgaste; materiales de granos finos adquieren mejores propiedades mecánicas y mejor resistencia al desgaste que los materiales de granos gruesos [15], estos últimos presentan más defectos e imperfecciones en la superficie.

Se aplicó el método planimétrico descrito en la norma ASTM E112-13 [16], el cual se desarrolla a partir de una micrografía de los materiales; para ello se utilizaron las micrografías obtenidas en la caracterización metalográfica. El método indica que se debe trazar una circunferencia de área conocida en una zona al azar de la micrografía y posteriormente contar la cantidad de granos completos que se encuentran dentro y la cantidad de granos interceptados por la frontera de la circunferencia. Luego se aplican las siguientes ecuaciones:

$$N_T = N_i + \frac{1}{2} N_{inter} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$N_A = \frac{N_T}{A} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\bar{A} = \frac{1}{N_A} \quad (\text{Ec. 3})$$



$$\bar{d} = \sqrt{\bar{A}} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$G = \frac{\text{Log } N_A}{\text{Log } 2} - 2,95 \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

$N_T$ : número total de granos.

$N_i$ : número de granos completos al interior de la circunferencia.

$N_{inter}$ : número de granos interceptados por la frontera de la circunferencia.

$N_A$ : número de granos / mm<sup>2</sup>.

$A$ : área conocida de la circunferencia en mm<sup>2</sup>.

$\bar{A}$ : área promedio de cada grano en mm<sup>2</sup>.

$\bar{d}$ : diámetro medio de cada grano en mm.

$G$ : número de tamaño de grano de acuerdo con la norma ASTM E112-13 [16].

## 2.5. Ensayo de desgaste.

Los ensayos de desgaste se realizaron en la máquina *Pin on Disk* que pertenece al laboratorio de tribología de la UTP. Esta máquina fue desarrollada por estudiantes de la escuela de tecnología mecánica y fue mejorada durante el trabajo de grado del ingeniero Jhon Diego Quintero [14], donde también desarrolló ensayos de desgaste.



**Figura 9.** Máquina *Pin on Disk*.

Estos ensayos se realizaron cumpliendo con las especificaciones de la norma ASTM G99-95a [2], la cual reglamenta el debido proceso sobre la realización de los ensayos de desgaste en una máquina *Pin on Disk*.

#### 1) Limpieza y secado de probetas.

Es importante limpiar muy bien los discos de prueba a utilizar con el propósito de medir correctamente la cantidad de masa inicial de estos antes de someterlos a los ensayos de desgaste. Se comenzó estregando fuertemente con una esponja, agua y jabón, luego con etanol, lo cual ayuda a eliminar grasas y suciedades, y, por último, se llevó el disco sumergido en un recipiente con etanol a una máquina de limpieza de ultrasonido durante 10 minutos. Es importante resaltar que para este procedimiento es indispensable lavarse y desinfectarse las manos a profundidad y utilizar guantes quirúrgicos para la manipulación de las probetas, evitando contaminarlas de grasa o suciedad que puede haber en el ambiente y/o cuerpo humano. El lavado de ultrasonido ayuda a desprender los últimos residuos de grasa y suciedad y garantiza una buena limpieza de los discos de prueba.

Por último, se secaron las probetas con un chorro de aire caliente para eliminar por completo cualquier residuo de los fluidos de limpieza que pudieran haber quedado en el material. Los equipos utilizados pertenecen al Laboratorio de Tribología de la UTP.

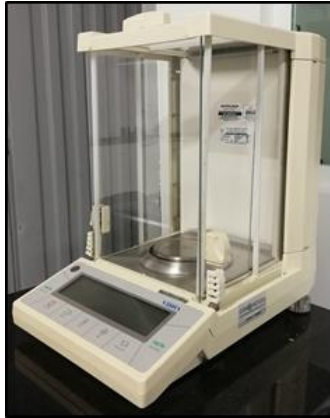


**Figura 10.** Limpiador por ultrasonido y equipo de chorro de aire caliente.

#### 2) Medición de cantidad de masa inicial.

Este procedimiento debe realizarse inmediatamente después al limpiado de las probetas, evitando que puedan contaminarse con algún elemento extraño que altere los resultados de la medición.

Se utilizó una báscula de precisión con una resolución de 0,0001 g para medir la cantidad de masa en gramos de cada uno de los discos de prueba, cada uno se pesó 5 veces diferentes con el fin de obtener una buena confiabilidad en los resultados. Luego se envolvieron cuidadosamente en un papel suave que los protegería lo más posible de la suciedad y se guardaron por separado. La báscula pertenece al Laboratorio de Tribología de la UTP.



**Figura 11.** Báscula de precisión.

### 3) Asentamiento del pin.

Antes de iniciar los ensayos de desgaste se debe garantizar que la superficie de trabajo del pin este completamente paralela y en total contacto con la cara del disco a ensayar, para lograrlo, se realizó un procedimiento de asentamiento del pin.

Se posicionó uno de los discos de prueba en el plato de la máquina *Pin on Disk*, garantizando con un comparador de carátula que quedara completamente horizontal; se situó sobre este un disco similar de papel de lija # 220 con el lado abrasivo hacía arriba.

Se ubicó el pin en el portapin de tal manera que el brazo basculante de la máquina quedara completamente horizontal y en equilibrio, con el pin tocando el disco de papel de lija sin hacer presión sobre él; se marcó la posición exacta del pin con un rayador como guía para el montaje del ensayo.

Se movió el brazo de la máquina para alejar el pin del disco mientras se ajustaba la velocidad de giro adecuada para el procedimiento, se puso en funcionamiento la máquina y se hizo girar el disco y el papel de lija a una velocidad moderada de 100 RPM; se instaló una carga moderada de 6 N en

el portacarga y se asentó el pin suavemente sobre el papel de lija; se dejó en funcionamiento por el tiempo necesario hasta que el desgaste de la superficie del pin fuera parejo y de esta manera se garantiza que ha quedado completamente plana y horizontal, y que por ende estará en total contacto con la cara del disco al momento del ensayo.

Una vez asentado el pin se desmontó cuidadosamente de la máquina y se limpió, secó y pesó tal como se describió en los numerales 1 y 2 para los discos.

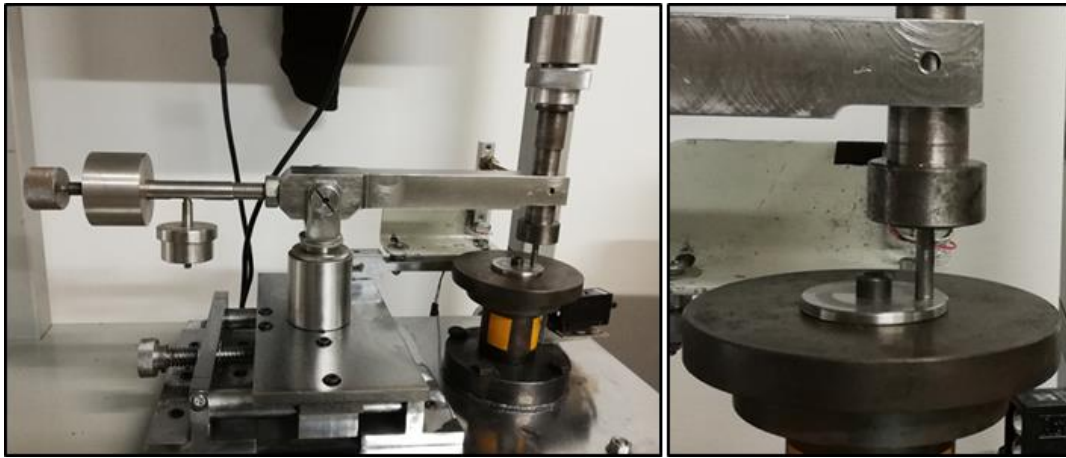
#### 4) Ensayo de desgaste.

Se insertó el disco de forma segura en el plato de la máquina, se limpió superficialmente y en seco la cara a ensayar con el fin de evitar suciedades mayores que puedan afectar los resultados del ensayo y se verificó con un comparador que el disco quedara completamente horizontal. Se insertó el pin en el mandril portapin en la posición que se había marcado anteriormente en el proceso de asentamiento (numeral 3). Se comprobó con un nivel que el brazo de la máquina quedara completamente horizontal y en equilibrio, con el pin sobre el disco, pero sin ejercer presión sobre este. Se levantó el brazo de la máquina evitando que el pin entrara en contacto con el disco mientras se ajustaba la carga y la velocidad de giro deseadas. Se agregó la cantidad de masa necesaria en el portacarga del sistema para desarrollar las fuerzas normales que presionarían el pin contra el disco (en esta investigación se utilizó una carga moderada de 6 N y una carga severa de 20 N). Se encendió el motor del plato y se ajustó la velocidad de giro en las 100 RPM girando la perilla del variador de frecuencia del motor.

Con el disco en movimiento, se ejecutó el software computacional que se encargaría de registrar el tiempo del ensayo, la velocidad de giro del plato y la fuerza tangencial del contacto entre el disco y el pin; aquí mismo se programó el tiempo de duración del ensayo (3600 segundos). El programa utilizado fue un proyecto para adquisición de datos (exclusivo para la máquina *Pin on Disk*), creado por estudiantes de la escuela de Tecnología Mecánica – UTP en la plataforma LabVIEW de National Instruments [17].

Tan pronto como se inició el programa y se encontraba registrando datos, se bajó el brazo de la máquina y se reposó suavemente el pin sobre el disco que estaba girando. En este momento el

ensayo había comenzado y no se podía interrumpir o reiniciar hasta que se cumplieran por completo los 3600 segundos estipulados.



**Figura 12.** Ensayo de desgaste.

Una vez concluido el tiempo, el software dejaría de recopilar datos del sistema, sin embargo, el motor que hacía girar el plato no se detendría automáticamente ni mucho menos se levantaría el pin que se encontraba desgastando el disco, por lo que fue sumamente importante estar pendiente del ensayo y levantar el brazo de la máquina justo cuando se cumplían los 3600 segundos, evitando que el disco se desgastara más de lo programado. Los datos recopilados por el software fueron guardados en archivos de Excel [18] para organizarlos y analizarlos posteriormente.

De los 6 discos obtenidos por cada acero, se ensayaron 3 de ellos con una carga normal de 6 N (moderada) y los otros 3 con una carga normal de 20 N (severa).

#### 5) Limpieza, secado y medición de masa final.

Por último, se procedió nuevamente con la limpieza, secado y pesaje de los discos de prueba y los pines tal como se describió en los numerales 1 y 2.

##### 2.5.1. Pérdida de masa y tasa de desgaste.

Luego de realizar los ensayos de desgaste, se calculó fácilmente la pérdida de masa de las probetas:

$$\text{Pérdida de masa} = \text{masa inicial} - \text{masa final} \quad (\text{Ec. 6})$$

Conociendo la pérdida de masa se pudo calcular la tasa de desgaste:

$$Tasa\ de\ desgaste = \frac{Pérdida\ de\ masa}{Tiempo\ de\ ensayo} \quad (Ec. 7)$$

Comparando los valores de tasa de desgaste obtenidos en cada material, se determinará cuál de ellos resiste más al desgaste en las condiciones exclusivas de los ensayos *Pin on Disk* realizados; a mayor tasa de desgaste, menor es la resistencia al desgaste y viceversa.

### 2.5.2. Coeficiente de fricción.

Se pudo calcular el coeficiente de fricción a partir de la definición de la fuerza de fricción:

$$F_r = \mu * N \quad (Ec. 8)$$

Donde:

$F_r$ : fuerza de fricción o de rozamiento.

$\mu$ : coeficiente de fricción.

$N$ : fuerza normal aplicada.

Nótese que la fuerza de fricción es equivalente a la fuerza tangencial obtenida en el ensayo de desgaste, y la fuerza normal aplicada corresponde a la carga utilizada. Por lo tanto, se calculó el coeficiente de fricción a partir de:

$$\mu = \frac{F_r}{N} \quad (Ec. 9)$$

## 2.6. Ensayo de dureza.

Se realizaron ensayos de dureza Rockwell B (HRB) en el metal base (muestras no alteradas) y en las zonas afectadas por el desgaste con el fin de comprobar si la superficie del acero se endurecía por el trabajo en frío al cual fue sometido (ensayo de desgaste). Esta es una de las características de los aceros inoxidables austeníticos (fácil endurecimiento por trabajo en frío). Se tomaron 5 mediciones de dureza por cada ensayo con el propósito de obtener confiabilidad en los resultados.

No fue posible realizar un ensayo de dureza óptico (por ejemplo, dureza Vickers), debido a que la zona afectada por el desgaste se encontraba rugosa y con índices de oxidación, y, por lo tanto, no se identificaba claramente la huella generada por un ensayo de dureza óptico. Tampoco era viable pulir la superficie rugosa y oxidada, pues de hacerlo, se perdería el grado de dureza superficial.

Para los ensayos de dureza se utilizó un escleroscopio HP-250 con un indentador de balón de acero de 1/16 de pulgada de diámetro; se aplicó una carga de 100 kgf y se esperaban resultados de dureza entre un rango establecido de 20 a 100 HRB. Este equipo pertenece al Laboratorio de Resistencia de Materiales de la UTP.



**Figura 13.** Escleroscopio HP-250.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 3.1. Preparación de probetas.

Las probetas obtenidas para para los ensayos de desgaste, luego del maquinado de las placas recibidas, se presentan en la figura 14. Estas cumplen con las indicaciones (dimensiones y rugosidad) estipuladas en la norma ASTM G99-95a [2]



**Figura 14.** Discos y pines obtenidos para los ensayos de desgaste.

Así mismo, las muestras empastilladas en baquelita termoestable o resina al frío para la caracterización metalográfica y determinación del tamaño de grano se presenta en la figura 15.

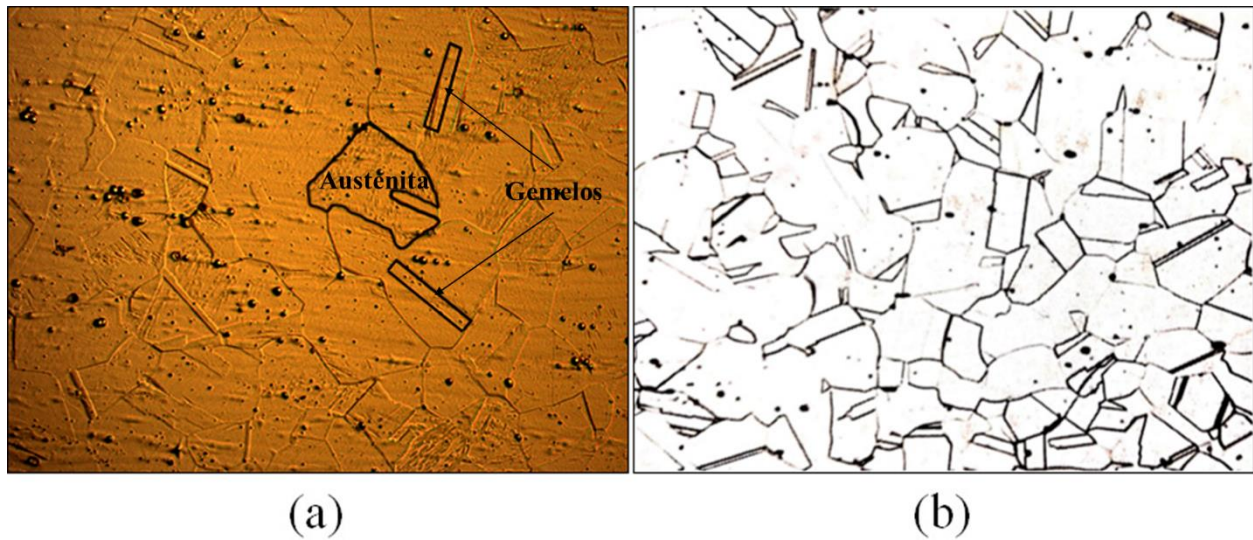


**Figura 15.** Muestras en baquelita para caracterización metalográfica y tamaño de grano.

#### 3.2. Caracterización metalográfica.

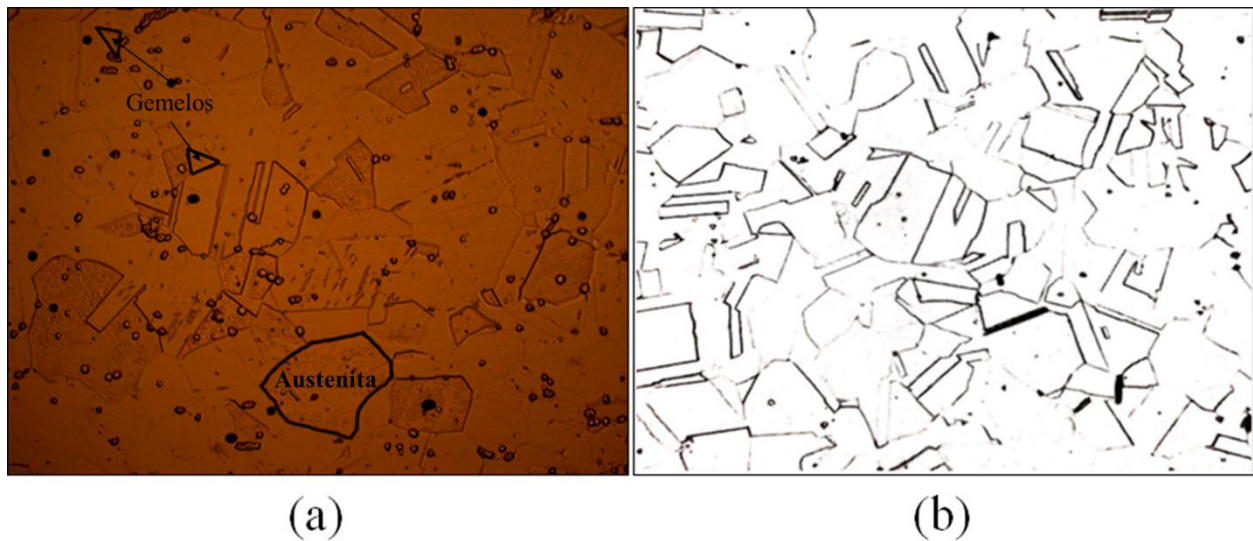
Las micrografías obtenidas fueron comparadas con la literatura con el fin de identificar el tipo de microestructura de los materiales. Para dicha comparación se utilizó el libro METALS HANDBOOK 8th Edition, VOL. 7 [19].





**Figura 16.** Microestructura y comparación del acero inoxidable AISI 304L.

En la figura 16 (a) se aprecia la microestructura obtenida para el acero AISI 304L mediante el microscopio óptico a 500X. En el HANDBOOK [19] se encontró una microestructura similar presentada en la figura 16 (b), la cual corresponde a un acero inoxidable austenítico tipo 304 a 250X. En ambas micrografías se pueden apreciar granos equiaxiales de austenita y granos gemelos.



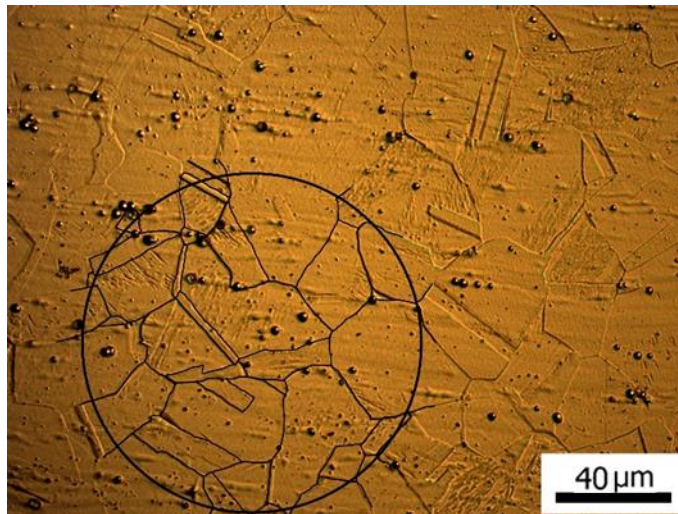
**Figura 17.** Microestructura y comparación del acero inoxidable P298A.

En la figura 17 (a) se aprecia la microestructura obtenida para el acero P298A mediante el microscopio óptico a 500X. En el HANDBOOK [19] se encontró una microestructura similar presentada en la figura 17 (b), la cual corresponde a un acero inoxidable austenítico tipo 201 a 250X; ya se había mencionado que el acero P298A no se encuentra normalizado (por ser una

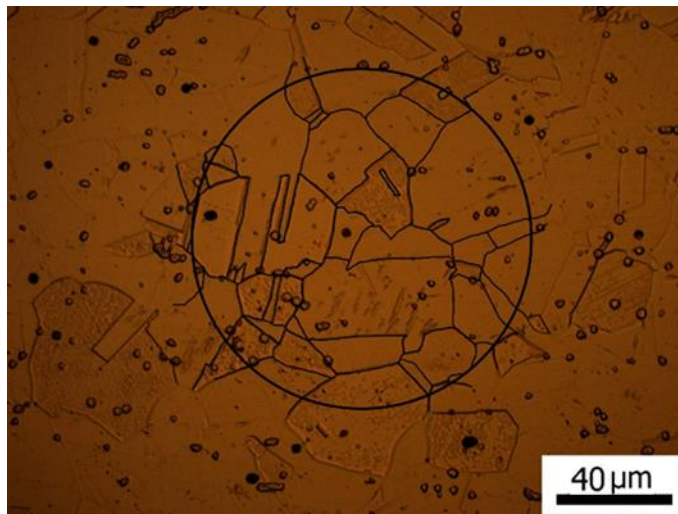
propuesta nueva), y por esta razón no se encuentra en la literatura, sin embargo, su composición es similar a la del acero normalizado AISI 201 y por eso su microestructura también es similar. En ambas micrografías se pueden apreciar granos equiaxiales de austenita y granos gemelos.

### 3.3. Tamaño de grano.

Se cuantificó el tamaño de grano de los materiales estudiados sobre las mismas micrografías presentadas en la caracterización metalográfica. El conteo de granos se presenta en las figuras 18 y 19 para los aceros AISI 304L y P298A respectivamente.



**Figura 18.** Conteo de granos para el acero AISI 304L.



**Figura 19.** Conteo de granos para el acero P298A.

Luego de aplicar el procedimiento y las ecuaciones descritas en el numeral 2.4 se obtuvo los siguientes parámetros del tamaño de grano para cada material.

**Tabla 4.** Resultados de tamaño de grano.

MATERIAL	PARÁMETRO							
	$N_i$	$N_{inter}$	$N_T$	$A$ [mm <sup>2</sup> ]	$N_A$ [mm <sup>-2</sup> ]	$\bar{A}$ [mm <sup>2</sup> ]	$\bar{d}$ [mm]	$G$
AISI 304L	15	25	28	0,0110	2507	0,0004	0,0200	8
P298A	25	21	36	0,0110	3236	0,0003	0,0176	9

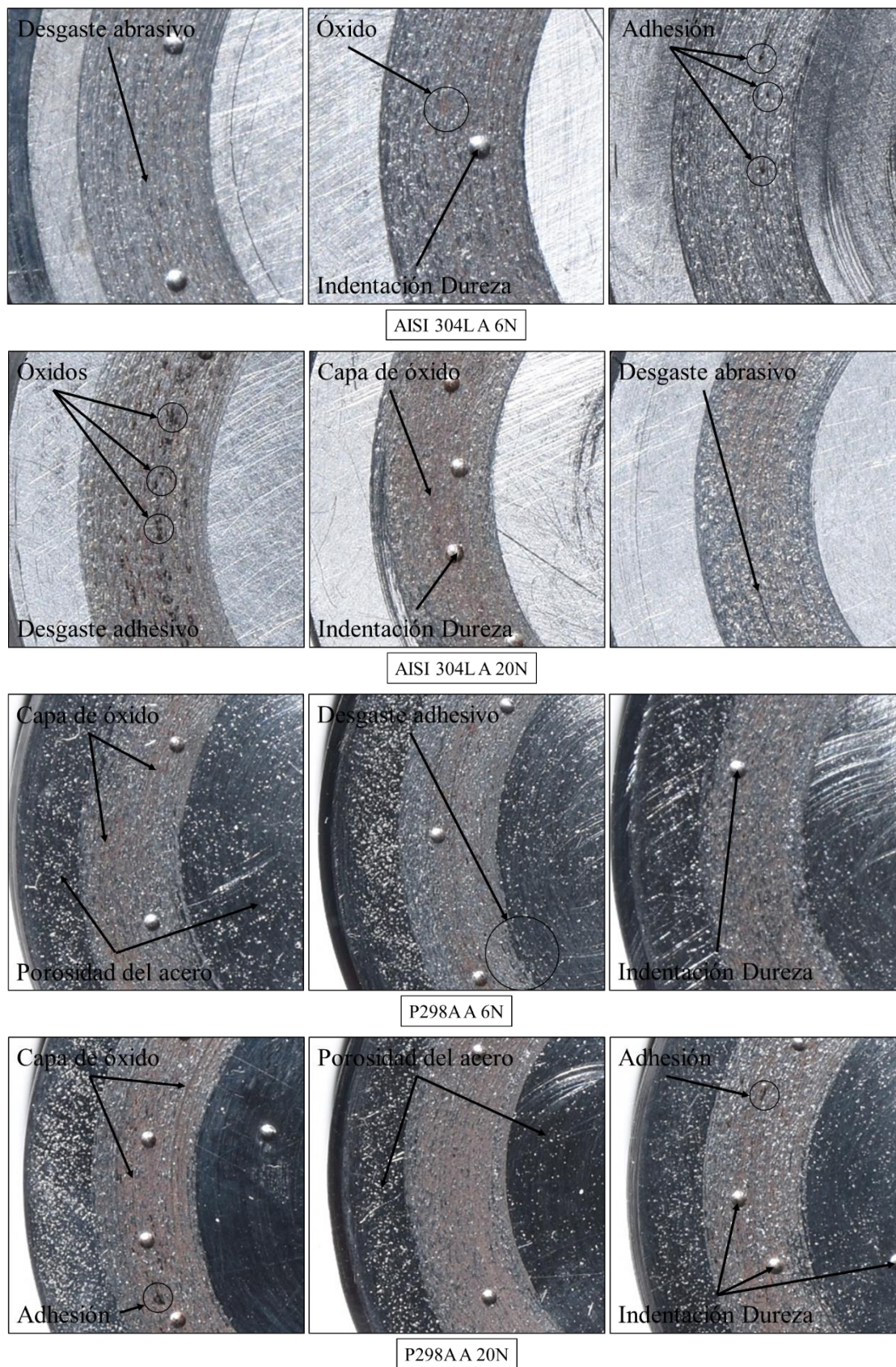
De la tabla 4 se puede apreciar que el tamaño de grano del acero P298A es menor que el del AISI 304L en un 25%, indicando que el inoxidable P298A presenta una composición de granos más fina. Esto se puede atribuir a la utilización del molibdeno como elemento austenitizante.

Materiales con una composición de granos fina han presentado una mejor resistencia mecánica y mayor dureza (proceso que se conoce como endurecimiento por refinamiento de grano) [14], y por eso, se esperan resultados de desgaste más favorables para el acero P298A.

### 3.4. Ensayos de desgaste.

Luego de los ensayos de desgaste, se analizaron las superficies afectadas para determinar el tipo de desgaste que se habría presentado (abrasivo, adhesivo, por fatiga, erosivo o corrosivo).





**Figura 20.** Superficies afectadas por los ensayos de desgaste.

Se puede apreciar principalmente un desgaste corrosivo, pues es clara la corrosión en la zona afectada por el desgaste. Durante los ensayos de desgaste se esperaba que este tipo de desgaste ocurriera, pues se podía percibir un ruido natural de las piezas en contacto y movimiento que variaba su intensidad con el tiempo, y esto, es un indicio de que la superficie de los materiales en contacto se está corroyendo, pues la corrosión de los materiales reduce drásticamente su dureza superficial y permite que sean desgastados más fácilmente al no oponer una resistencia al movimiento mecánico que los está atacando (desgaste abrasivo), es decir que, durante los periodos de tiempo donde el ruido percibido era de baja intensidad, se estaba desgastando la corrosión generada en la superficie de los materiales (pines y discos).

También es evidente un desgaste por fatiga, en presencia de la carga de 20 N, pues los ensayos de *Pin on Disk* aplicados representan claramente un movimiento relativo entre la superficies unidireccional y constante durante el tiempo de ensayo (3600 segundos), lo cual provoca que la superficie del disco sea desgastada por exceso de trabajo mecánico (desgaste por fatiga).

El desgaste abrasivo ya fue mencionado anteriormente y se puede decir que es el tipo de desgaste más común en la mayoría de los sistemas tribológicos, pues al haber un movimiento mecánico entre dos superficies en contacto es inevitable un desgaste abrasivo, el cual se evidencia en la remoción de material a lo largo y ancho de la pista generada por los ensayos de desgaste (surcos, rayones, etc.).

Por último, se aprecia un desgaste adhesivo, el cual se reconoce por las deformaciones plásticas en las superficies de los materiales y en las zonas de óxido marrón que se presentan en la superficie desgastada, la cual debe corresponder a partículas de carbono del pin que se adhirieron al disco.

#### 3.4.1. Tasa de desgaste.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la tasa de desgaste para cada material, el cual corresponde a la relación entre la cantidad de pérdida de masa y el tiempo de duración del ensayo.

**Tabla 5.** Resultados de tasa de desgaste.

MATERIAL	CARGA [N]	No. DE ENSAYO	TASA DE DESGASTE [g/s]	PROMEDIO [g/s]
AISI 304L	6	1	2,4500E-06	2,2352E-06
		2	2,2889E-06	
		3	1,9667E-06	
	20	1	2,8056E-06	2,9556E-06
		2	2,3722E-06	
		3	3,6889E-06	
P298A	6	1	1,4667E-06	1,6981E-06
		2	2,1111E-06	
		3	1,5167E-06	
	20	1	2,7333E-06	1,8852E-06
		2	1,6389E-06	
		3	1,2833E-06	

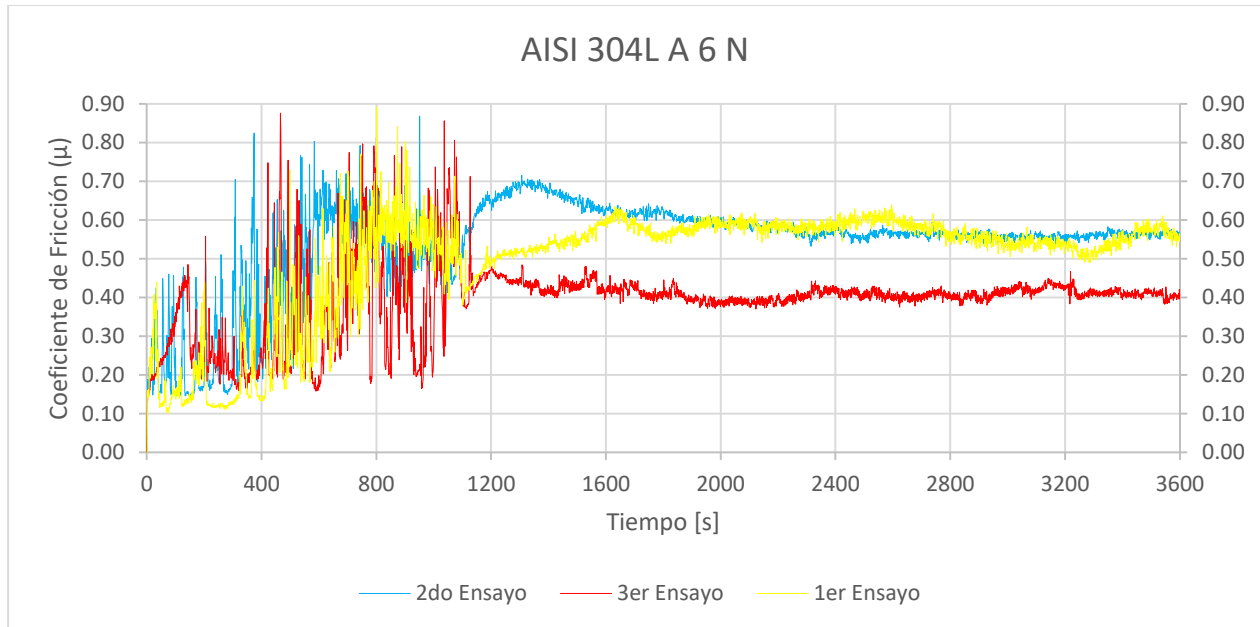
En la tabla 6 se puede apreciar que los resultados de tasa de desgaste obtenidos son generalmente mayores en el acero inoxidable AISI 304L, incluso, la mayor tasa de desgaste se obtuvo en el ensayo número 3 del acero AISI 304L con una carga de 20 N (3,6889E-06); esto indica que el acero P298A es más resistente al desgaste (alrededor del 32 al 57%) que el acero AISI 304L en las condiciones exclusivas de los ensayos *Pin on Disk* realizados.

También se puede apreciar que para cargas severas (20 N) la tasa de desgaste fue mayor en cada material, 32% en el AISI304L y 11% en el P298A, lo cual es coherente con la carga aplicada en cada caso.

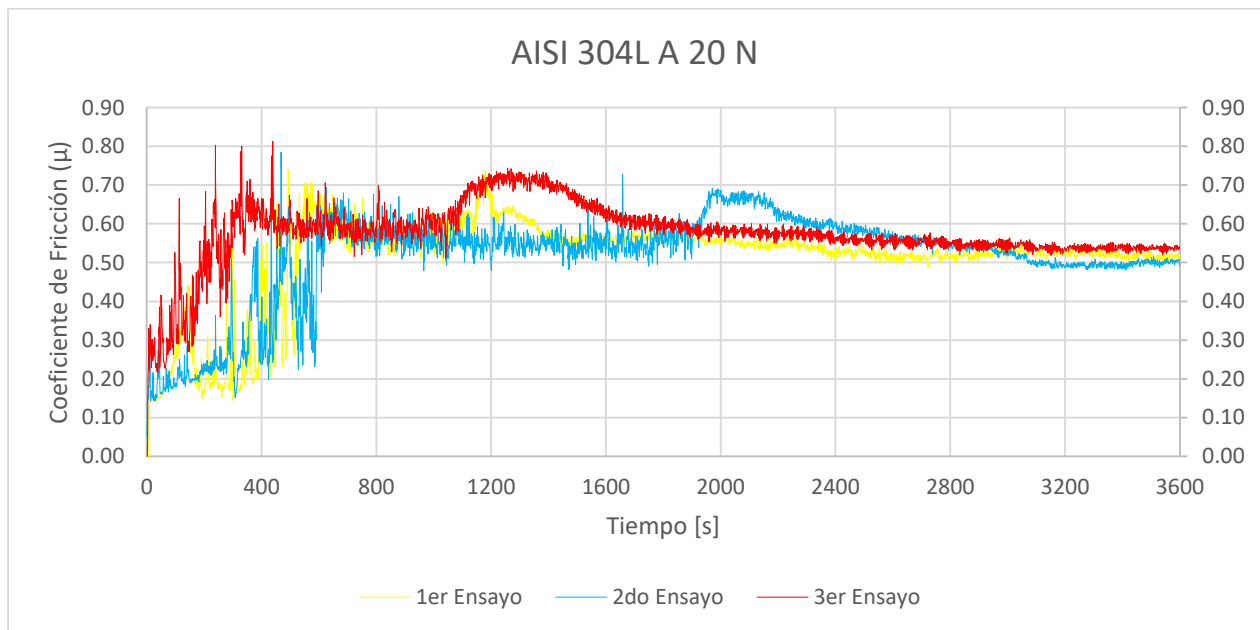
Es importante resaltar que los resultados de tasa de desgaste obtenidos se relacionan con los resultados de tamaño de grano, pues el acero P298A presentó una composición de granos más finos y por esto debería ser más resistente al desgaste, lo cual se confirmó con los resultados de tasa de desgaste; caso contrario a los resultados obtenidos para el acero AISI 304L.

### 3.4.2. Coeficiente de fricción.

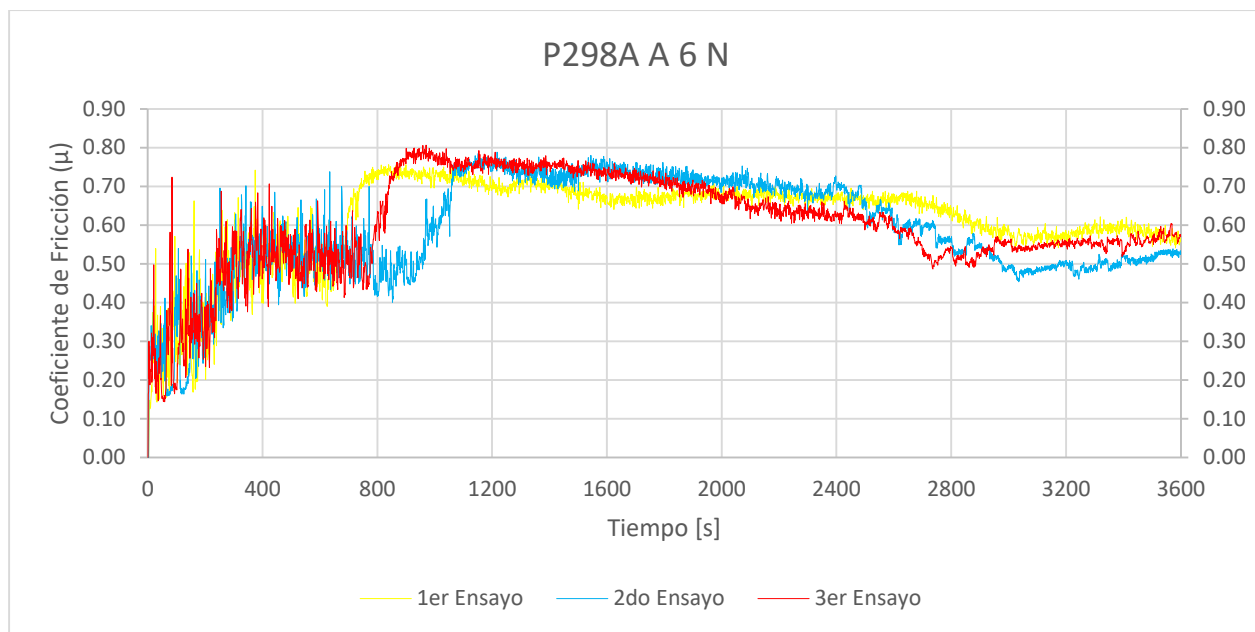
Se calculó el coeficiente de fricción con la ecuación 9 para cada instante de tiempo de los ensayos de desgaste y se graficó por material y carga aplicada; estas graficas se presentan a continuación.



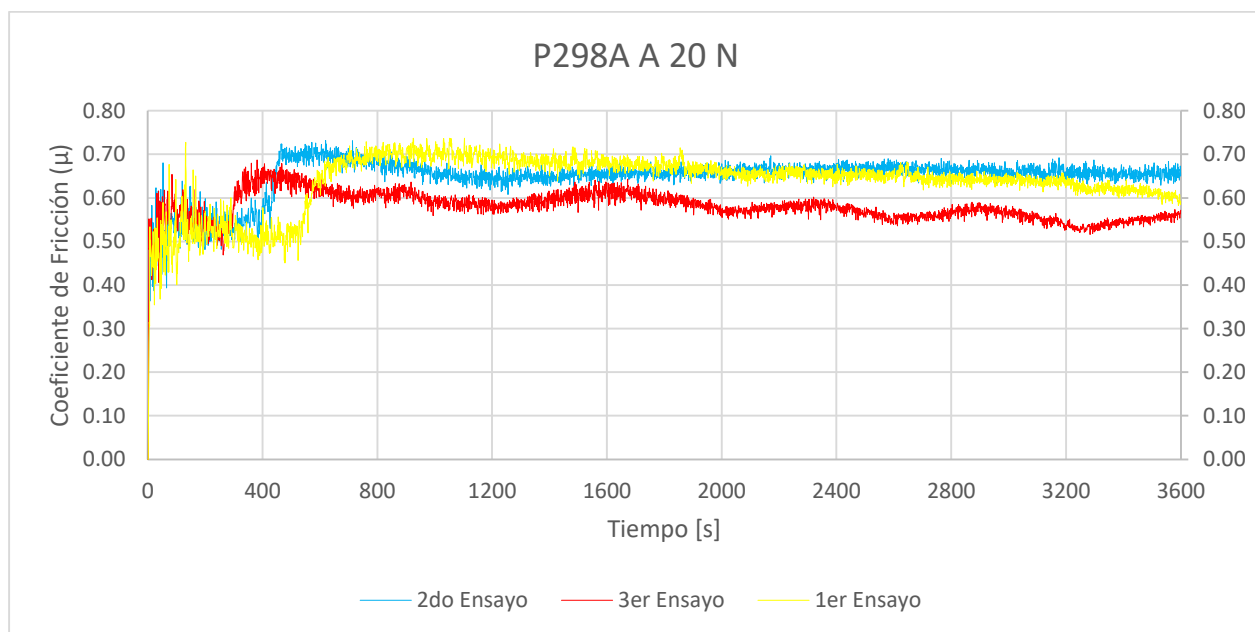
**Figura 21.** Coeficiente de fricción del acero AISI 304L con una carga de 6 N.



**Figura 22.** Coeficiente de fricción del acero AISI 304L con una carga de 20 N.



**Figura 23.** Coeficiente de fricción del acero P298A con una carga de 6 N.



**Figura 24.** Coeficiente de fricción del acero AISI 304L con una carga de 20 N.

De las figuras 21 a la 24 se puede apreciar un comportamiento del coeficiente de fricción muy inestable al inicio de los ensayos, lo que podría entenderse como una respuesta transitoria del sistema, la cual presenta una mayor duración en los ensayos realizados con una carga de 6 N (figuras 21 y 23); este comportamiento puede explicarse con el hecho de que la transición de desgaste corrosivo – abrasivo es más lenta en sus inicios para carga menores [20].



También se puede apreciar que para el acero AISI 304L el coeficiente de fricción estable oscila alrededor de 0,5 (figuras 21 y 22) y para acero P298A esta alrededor de 0,6 (figuras 23 y 24). Este es un resultado favorable para el acero P298A, pues un coeficiente de fricción más alto implica una mayor oposición al deslizamiento entre dos cuerpos, lo que se puede traducir en una mayor resistencia a ser desgastado por deslizamiento y, por lo tanto, los coeficientes de fricción obtenidos guardan coherencia con los resultados de desgaste (sección 3.4.1).

### 3.5. Resultados de dureza.

En la tabla 6 se presentan los resultados de dureza obtenidos en dos muestras de cada material (no alteradas con algún proceso mecánico), con el fin de establecer el grado de dureza inicial de los aceros estudiados (antes de someterlos a los ensayos de desgaste) y posteriormente determinar si hubo un incremento en la dureza superficial luego de los ensayos de desgaste realizados.

**Tabla 6.** Resultados de dureza en muestras no alteradas.

MATERIAL	DUREZAS MUESTRA 1 [HRB]	DUREZAS MUESTRA 2 [HRB]	PROMEDIO [HRB]
AISI 304L	91	90	$89,6 \pm 0,7$
	89	89	
	90	89	
	90	90	
	89	89	
P298A	91	92	$90,8 \pm 0,9$
	90	92	
	90	90	
	90	92	
	91	90	

**Tabla 7.** Resultados de dureza para el acero AISI 304L en las zonas afectadas por el desgaste.

CARGA [N]	ENSAYO DE DESGASTE			PROMEDIO [HRB]
	1 [HRB]	2 [HRB]	3 [HRB]	
6	90	90	90	90,2 ± 0,6
	91	90	89	
	91	91	91	
	90	90	90	
	90	90	90	
20	90	92	90	90,2 ± 1,0
	92	90	90	
	91	90	90	
	90	89	90	
	91	90	88	

Al comparar los resultados obtenidos en la tabla 7 con el respectivo grado de dureza de la tabla 6, se puede apreciar un incremento en la dureza superficial del 0,67% para las dos cargas utilizadas en los ensayos de desgaste, lo cual es coherente con la característica de los aceros austeníticos de endurecimiento por trabajo en frío [7].

**Tabla 8.** Resultados de dureza para el acero P298A en las zonas afectadas por el desgaste.

CARGA [N]	ENSAYO DE DESGASTE			PROMEDIO [HRB]
	1 [HRB]	2 [HRB]	3 [HRB]	
6	92	92	92	92,1 ± 0,5
	93	92	91	
	92	93	93	
	92	92	92	
	92	92	92	
20	91	92	92	92 ± 0,8
	91	93	92	
	91	93	93	
	92	92	93	
	91	91	93	

En este caso, el incremento del grado de dureza superficial fue del 1,43% y 1,32% para las cargas de 6 N y 20 N utilizadas en los ensayos de desgaste respectivamente y, se comprueba nuevamente el endurecimiento por trabajo en frío que caracteriza a los aceros austeníticos [7]. Nótese que al igual que en el caso del acero AISI 304L la dureza superficial luego de los ensayos de desgaste es muy similar en cada carga utilizada, indicando que el endurecimiento es independiente de la carga normal.

Es importante resaltar que el acero P298A se endureció más que el acero AISI 304L, siendo otro resultado favorable para este acero, pues a mayor dureza superficial, adquiere más resistencia a ser rayado y, por lo tanto, puede resistir en mayor medida un desgaste abrasivo, guardando coherencia con los resultados de desgaste obtenidos en la sección 3.4.1.

#### 4. CONCLUSIONES

Se evaluó y comparó la resistencia al desgaste de los aceros inoxidable austeníticos 304L y P298A mediante ensayos de desgaste en una máquina *Pin on Disk*, y se obtuvo resultados más favorables para el inoxidable P298A, aproximadamente entre un 32% (bajo carga leve) y un 57% (bajo carga severa) más resistente al desgaste bajo las condiciones exclusivas de los ensayos de desgaste realizados. Se pudo apreciar que para las cargas severas utilizadas (20 N) el desgaste fue mayor en ambos materiales que para las cargas leves utilizadas (6 N); un resultado coherente y esperado.

Es muy importante resaltar que los resultados de esta investigación son exclusivos para las condiciones de trabajo en los ensayos realizados, porque los sistemas tribológicos son extremadamente complejos y con una variación en cualquiera de los parámetros (condiciones ambientales, tratamientos térmicos, etc.) los resultados podrían cambiar.

Se realizó una caracterización metalográfica de los aceros de la cual se obtuvo la microestructura de cada uno; allí se pudo apreciar los granos de austenita y algunos granos gemelos. Posteriormente, con ayuda de las micrografías obtenidas, se determinó el tamaño de los materiales estudiados y se obtuvo que el acero P298A presenta una composición de granos más fina que el acero 304L, lo cual indica que tiene una mejor resistencia mecánica y al desgaste.

Se determinaron los mecanismos y tipos de desgaste presentados en los materiales luego de los ensayos de desgaste realizados. Tipos de desgaste: desgaste corrosivo, desgaste abrasivo y desgaste adhesivo. Mecanismos de desgaste: surcos, rayones, fatiga y deformaciones plásticas.

Se calculó el coeficiente de fricción en cada material y se obtuvo un valor de 0,6 para el acero P298A y de 0,5 para el acero 304L. Un mayor coeficiente de fricción implica una mayor resistencia al deslizamiento entre dos superficies, lo cual puede relacionarse con una mejor resistencia al desgaste.

Se realizó un análisis del grado de dureza superficial de los materiales, y se obtuvo que luego de los ensayos de desgaste realizados ambos materiales se endurecieron superficialmente, comprobando la característica de los aceros inoxidable austeníticos de endurecimiento por trabajo en frío. Además, el acero P298A se endureció en mayor proporción que el acero 304L, lo cual le

otorga una mayor resistencia a ser rayado superficialmente, esta propiedad mecánica también puede relacionarse con una mejor resistencia al desgaste.

Por último, la respuesta a los dos interrogantes planteados en la introducción es:

- Entre los aceros inoxidable austeníticos 304L y P298A, la microestructura del P298A resiste más al desgaste por deslizamiento bajo las condiciones exclusivas de los ensayos de desgaste realizados en una máquina *Pin on Disk*.
- La adición de manganeso en aceros inoxidable ayuda a refinar el grano del material y mejora la resistencia mecánica y al desgaste.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Dairo Hernán Mesa Grajales; Oscar Fabian Higuera Cobos & Edwan Anderson Ariza Echeverri, *Fundamentos de tribología*, Universidad Tecnológica de Pereira, primera edición, Pereira, 2017.
- [2] ASTM G99-95a(2000)e1, *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [3] Gabriele Di Caprio, *LOS ACEROS INOXIDABLES*, Grupinox, segunda edición española ampliada y renovada (traducción de la 3ª edición italiana), Barcelona, 1999.
- [4] Mauricio González Quiceno, *ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN POR PICADURA DE LOS ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS UNS S30403 Y UNS S20100, BAJO NORMA ASTM G48, EN DIFERENTES TIEMPOS DE INMERSIÓN*, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2015.
- [5] J. Charles, J.-D. Mithieux, J. Krauschick, N. Suutala, J. Antonio Simón, B. Van Hecke & T. Pauly, *A new European 200 series standard to substitute 304 austenitics*, La Revue de Métallurgie, EDP Sciences, Les Ulis, 2009, [www.edpsciences.org](http://www.edpsciences.org)
- [6] María Cristina Moré Farías, *Inuência da velocidade de deslizamento, da carga normal e da transformação martensítica induzida por deformação plástica na resistência ao desgaste por deslizamento dos aços inoxidáveis austeníticos*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- [7] MIPS A, *Clasificación del acero inoxidable*, Metales Industriales de Puebla S.A. de C.V., Puebla, 2019, [www.mipsa.com.mx](http://www.mipsa.com.mx)
- [8] Phillip B. Abel & John Ferrante, *Surface Physics in Tribology*, MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK, Volume One, Principles of tribology, CRC Press LLC, Boca Ratón, 2001
- [9] Zum Gahr, *Microstructure and Wear of Materials*, ELSEVIER, Amsterdam, 1987.

- [10] Kenneth C Ludema, *Friction*, MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK, Volume One, Principles of tribology, CRC Press LLC, Boca Ratón, 2001
- [11] Takadoun, *Materials and Surface Engineering in Tribology*, Jhon Wiley & Sons, Inc., Londres, 2008.
- [12] Koji Kato & Koshi Adachi, *Wear Mechanisms*, MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK, Volume One, Principles of tribology, CRC Press LLC, Boca Ratón, 2001
- [13] Felipe Díaz del Castillo Rodríguez, *LECTURAS DE INGENIERÍA 2: TRIBOLOGÍA: FRICCIÓN, DESGASTE Y LUBRICACIÓN*, Universidad Nacional Autónoma de México, Cuautitlán Izcalli, 2007.
- [14] Jhon Diego Quintero Vásquez, *Efecto de la temperatura de revenido y la adición de Niobio sobre la resistencia al desgaste de aceros supermartensíticos 13Cr5Ni2Mo*, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2017.
- [15] Miles, M. P., Nelson, T. W., Gunter, C., Liu, F. C., Fourment, L., & Mathis, T., *Predicting recrystallized grain size in friction stir processed 304L stainless steel*, Journal of Materials Science & Technology VOL 35, ELSEVIER, Amsterdam, 2019.
- [16] ASTM E112-13, *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [17] National Intrumets, *LabView*, NI, 1986, <http://www.ni.com/es-co.html>
- [18] Microsoft Office, *Microsoft Excel, Microsoft Word & Microsoft Power Point*, Microsoft, 1985, <https://www.microsoft.com/es-co/>
- [19] ASM HANDBOOK COMMITTEE, *Atlas of Microstructures of Industrial Alloys*, METALS HANDBOOK, 8<sup>th</sup> Edition, VOL. 7, AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Metals Park, Ohio, 1972.
- [20] Welsh N. C., *The dry wear of steels I. The general pattern of behaviour*, PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS A, THE ROYAL SOCIETY, Londres, 1965.